ノ ー ト

シリコン・アバランシェ・ダイオードによる 陽電子の検出ならびに陽電子寿命の β^+ - γ 同時計測測定

Prasert CHALERMKARNNON *¹, 柚賀正雄 *¹, 中田 智 *¹,
岸本俊二 *², 荒木秀樹 *¹, 白井泰治 *¹

*¹ 大阪大学大学院工学研究科マテリアル科学専攻

565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

*² 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所放射光研究施設

305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

2000年9月25日 受理

Key Words : positron, positron annihilation, positron lifetime measurement,
positron-gamma coincidence, avalanche diode, time resolution

1. 緒 言

陽電子消滅寿命法は、材料中の空孔やその集合体、転位等の微小欠陥をきわめて敏感に検出し、その種類と量を識別することができるユニークな手法である¹⁾。陽電子寿命測定法として従来多用されてきた γ - γ 同時計測法は、同時計測率が低く、また陽電子線源と試料を密着させる必要があり、測定条件(温度等)や試片の形状などに大きな制約があった。この制約を取り除くために、線源と試料が空間的に離れた状態でも陽電子寿命測定が可能な β^+ - γ 同時計測によるスペクトロメータが開発された²⁾。この場合、試料と線源の距離が離れていても、試料に入射する陽電子を直接検出してスタート信号を得ることにより陽電子寿命測定が可能である。陽電子を直接検出する手段として、プラスチックシンチレータとライトガイドと光電子増倍管(PMT)の組合せが採用されてきたが、時間分解能や検出効率などに問題があった³⁾⁻⁵⁾。それを改良するために、電子⁶⁾やX線⁷⁾などを高時間分解能かつ高い検出効率で検出できるアバランシェ・ダイオードに着目した。本研究で、アバランシェ・ダイオードにより直接陽電子を検

出し、 β^+ - γ 同時計測陽電子寿命測定にはじめて成功したので、その結果を報告する。

2. アバランシェ・ダイオードによる陽電子の検出

アバランシェ・ダイオードに、逆バイアス電圧をかけ、ブレイクダウン電圧近くに設定しておく、入射陽電子によって伝導帯に励起された電子によるなだれ現象(アバランシェ)が起こる。この現象により、PMTのように内部増幅が起こり、 10^{-10}^3 の電流増幅を行うことができる。アバランシェ・ダイオードの特徴として、エネルギー分解能がよい、感度が高い、応答速度が速い、ノイズが少ないなどが挙げられる。問題点としてはシリコン素材の放射線損傷によるアバランシェ・ダイオードの分解能の劣化、出力信号の波形が2重、3重のピークになるなどが知られている^{8), 9)}。これは放射線の強い環境下、たとえば2 MeVの電子に 2.3×10^{13} 電子/cm²の照射量まで照射された場合に起こることが報告されている¹⁰⁾。本研究では、陽電子エネルギーは平均0.2 MeV、最大でも約0.5 MeVであり、線量率も低い(~ 1 MBq)ので、放射線損傷によるアバランシェ・ダイオードの

劣化は無視できる程度と考えられる。

本研究では、厚さ $110\ \mu\text{m}$ 、有効領域 $5\times 5\ \text{mm}^2$ の透過型 Silicon Avalanche Photodiode (EG&G Optoelectronics ; C30626- CD2276 : Dark Current = 250 nA, Noise Current Density = $0.5\ \text{pA}\ \text{Hz}^{-1/2}$, Response Time = 5 ns ; at 22°C) を用いた。ブレークダウン電圧が 340 V であるので、300 V の電圧をかけた状態で使用した。アバランシェ・ダイオードの内部増幅のみでは出力信号が小さ過ぎるので、増幅率100倍の低ノイズプリアンプ (Phillips Scientific; 6954) を用いた。陽電子線源は、 $\phi 12\ \text{mm}$ の $1\ \text{mg}\ \text{cm}^{-2}$ ポリマイドフィルム (カプトン箔) 中に密封された $1.2\ \text{MBq}$ の ^{22}Na 線源を用いた。Fig. 1 に陽電子による出力信号の一例を示す。立上り時間約 1.6 ns, パルス高さ最大約 1.5 V のアバランシェ・ダイオードによる ^{22}Na 密封線源からの陽電子検出信号が得られている。装置の時間分解能を左右すると考えられる検出信号の立上り時間は、 BaF_2 シンチレータと PMT による γ 線検出信号 (立上り時間約 1.2 ns) と比較すると、アバランシェ・ダイオードの方がやや遅いものの、それほど大きな差ではなく、十分早い立上り時間である。

^{22}Na 線源からは、Fig. 2 のように種々のエネ

Fig. 1 Pulses obtained for positrons from ^{22}Na as detected by an avalanche diode and shaped by preamplifier.

ルギーを持った陽電子が放射される¹¹⁾。アバランシェ・ダイオードを透過する陽電子のエネルギーによって、失うエネルギーも違ってくるため、種々の大きさの出力信号が検出されるはずである。実際にアバランシェダイオードからの検出信号のパルス高さ (陽電子が失うエネルギーに対応するもの) の分布を、ディファレンシャルコンスタントフラクショナルディスクリミネータ (DCFD) を用いて測定したものが Fig. 3 である。Fig. 2 に対応するピークが観測されている。

Fig. 2 Positron energy distribution emitted from ^{22}Na .

Fig. 3 Relationship between counting rate and output pulse amplitude of an avalanche diode for positrons from ^{22}Na .

3. アバランシェ・ダイオードを用いた陽電子寿命測定

3.1 測定装置

透過型アバランシェ・ダイオードによる陽電子の直接検出に成功したので、これをスタート信号として用い、 β^+ - γ 同時計測陽電子寿命測定を行った。ストップ信号は試料からの消滅 γ 線をBaF₂シンチレータとPMTにより検出した。Fig. 4に β^+ - γ 同時計測陽電子寿命測定装置のブロック図を示した。

アバランシェ・ダイオードの直近に1.2 MBqの²²Na密封線源をセットし、アバランシェ・ダイオードの反対側に試料をセットした。アバランシェ・ダイオードを透過した陽電子は試料内で消滅する。PMTでストップ信号を取る際、アバランシェ・ダイオードのホルダーなどの試料以外での消滅 γ 線を除去するため、BaF₂とPMTの検出システムをもう1本対向させ、同時検出系を構成した。すなわち、消滅 γ 線はほぼ正反対の方向に2本放出されるため、陽電子が試料内で消滅したときのみ2本の消滅 γ 線が両方のPMTに同時に入射することを利用した。この同時信号を、時間差波高変換器(TAC)から出力される陽電子消滅寿命の信号

のゲートとしてスペクトル測定を行い、試料の陽電子寿命スペクトルを得た。

BaF₂シンチレータとPMTによる消滅 γ 線の検出効率は悪い(約0.1)ため、上記の方法で、装置のデータ集積速度は約50 events/sであった。陽電子が線源から試料へ入射する立体角と、試料からの消滅 γ 線がストップ検出系と同時検出系に同時に入射できる立体角を大まかに見積もると、10⁻²オーダーの割合の計数率であり、これにBaF₂とPMTの消滅 γ 線の検出効率を合わせると10⁻⁴オーダーになる。10⁶ Bqの強さの線源を使用しているため、陽電子検出器を通過できないものも考慮すれば、装置全体の計数率は1秒に50程度となる。

3.2 測定結果

アバランシェ・ダイオードを用いた β^+ - γ 同時計測陽電子寿命測定装置を検証するために、焼鈍されたNiと石英を試料として用い、それぞれ室温にて陽電子寿命測定を行った。測定は、1スペクトル当たり約10⁶ eventsのスペクトルを収集した。得られた陽電子寿命スペクトルをFig. 5に示す。それぞれの試料について、 γ - γ 同時計測法と同様の、両物質に固有のスペクトルが得られた。Niの寿命スペクトルについて

Fig. 4 Block diagram of the β^+ - γ coincidence positron lifetime spectrometer. PMT : photomultiplier tube, HV : high voltage power supply, DCFD : differential constant fraction discriminator, FC : fast coincidence, TAC : time-to-amplitude converter, ADC : analog-to-digital converter, MCA : multichannel analyzer.

Fig.5 Positron lifetime spectra for nickel and fused quartz measured at room temperature by using the $\beta^+ - \gamma$ coincidence positron lifetime spectrometer with an avalanche diode.

RESOLUTION¹²⁾プログラムで解析すると、約120 psの陽電子寿命値が得られ、時間分解能(FWHM)は約240 psであった。石英の寿命スペクトルについても同じ時間分解能が得られ、約330 psと1.4 nsの2成分の陽電子寿命値が得られた。この時間分解能は、プラスチックシンチレータを用いた過去の $\beta^+ - \gamma$ 同時計測法の値(270 ps³⁾, 370 ps⁴⁾, 368 ps¹³⁾)と比べて明らかに優れたものである。

4. 結 語

本研究で、透過型アバランシェ・ダイオードによる陽電子の直接検出に成功した。また、アバランシェ・ダイオードをスタート信号検出器とした $\beta^+ - \gamma$ 同時計測陽電子寿命測定にも成功した。時間分解能は $\gamma - \gamma$ 同時計測法に比較しても遜色のない240 psという優れた値が得られた。これまで採用されてきたプラスチックシンチレータとライトガイドと光電子増倍管の組み合わせに替わり、陽電子検出器としてアバランシェ・ダイオードが非常に有用であることが実証された。これにより、 $\gamma - \gamma$ 同時計測法より汎用性の高い、 $\beta^+ - \gamma$ 陽電子寿命スペクトロメータの普及にはずみがつくことが期待される。

文 献

- 1) 白井泰治: “陽電子計測の科学”, pp.75 - 82, 日本アイソトープ協会, 東京(1993)
- 2) Maier, K. and Myllyla, R.: “Positron Annihilation”, (Fujiwara, K. and Hashiguchi, R. R. eds.), pp. 829-831, The Japan Institute of Metals, Sendai (1979)
- 3) Weiler, W., Schaefer, H. E. and Maier, K.: “Positron Annihilation”, (Coleman, P. G., Sharma, S. C. and Diana, L. M. eds.), pp. 865-867, North-Holland, Amsterdam (1982)
- 4) Kostamovaara, J., Karras, M. and Myllyla, R.: “Positron Annihilation”, (Coleman, P. G., Sharma, S. C. and Diana, L. M. eds.), pp. 868-870 (1982)
- 5) 白井泰治, 坂村 勝, 穴戸逸朗, 山口正治: 日本金属学会誌, **59**, 679-680 (1995)
- 6) Hauger, J. A., Choi, Y., Hirsch, A. S., Scharenberg, R. P., Stringfellow, B. C., Tincknell, M.L., Porile, N. T., Rai, G., Garbarino, J. and McIntyre, R. J.: *Nucl. Instrum. Met. Phys. Res. A*, **337**, 362-369 (1994)
- 7) Kishimoto, S.: *J. Synchrotron Rad.*, **5**, 275-279 (1998)
- 8) Klingensmith, R. W.: *IRE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-8**, 112-115 (1961)
- 9) Dearnaley, G.: *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-10**, 106-110 (1963)
- 10) George, G. G. and Gunnarsen, E. M.: *Nucl.*

Instrum. Meth., **25**, 253-260 (1964)

- 11) 村上悠紀雄, 團野皓文, 小林昌敏: “放射線データブック”, pp. 15-16, 地人書館, 東京 (1982)
- 12) Kirkegaard, P., Eldrup, M., Mogensen, O. E. and Pedersen, N. J. : *Comput. Phys. Commun.*, **23**, 307-335 (1981)
- 13) Schaefer, H. E. and Maier, K. : “Positron Annihilation”, (Jain, P. C., Singru, R. M. and Gopinathan, K. P. eds.), pp. 584-585, World Scientific, Teaneck (1985)

Abstract

Detection of Positrons through Silicon Avalanche Diodes and Its Application to β^+ - γ Coincidence Positron Lifetime Measurement . Prasert CHALERMKARNNON, Masao YUGA, Satoshi NAKATA, Shunji KISHIMOTO*, Hideki ARAKI and Yasuharu

SHIRAI : Department of Materials Science and Engineering, Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan, *Photon Factory, Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization, 1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki Pref. 305-0801, Japan.

Silicon avalanche diode was tested as new fast detector for positron annihilation experiments. The timing signal is initiated by a positron passing directly through an avalanche diode. Obtained time resolution is comparable to that obtained with a conventional plastic scintillator and photomultiplier tube. A β^+ - γ coincidence positron lifetime spectrometer was constructed by using an avalanche diode as the detector for start signal and an excellent time resolution, 240 ps (FWHM), for the total system was accomplished.

(Received September 25, 2000)